



ساخت افزایشی قطعات توربین گاز از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل

علی محمد کلاگر

دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، شرکت مهندسی مواد کاران، گروه مینا، تهران، ایران.
کرج، صندوق پستی ۳۱۷۵۵/۱۴۴، Kolagar.AliMohammad@mapnamk.com

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۷ تیر ۱۴۰۱
داوری اولیه: ۱۵ تیر ۱۴۰۱
پذیرش: ۱۵ مرداد ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

ساخت افزایشی
ذوب انتخابی لیزر
سوپر آلیاژ
سویلر
توربین گاز

سویلر محفظه احتراق توربین گاز معمولاً از جنس سوپرآلیاژهای پایه نیکل طراحی و به روش مرسوم ریخته‌گری دقیق تحت خلاء تولید می‌شود. تولید اینگونه قطعات بخاطر پیچیدگی‌های هندسی، دقت ابعادی بالا و همچنین استفاده از ماهیچه‌های سرامیکی با ضایعات بالایی همراه می‌باشد. در دهه‌های اخیر استفاده از فرایند ساخت افزایشی بعنوان روش نوین و جایگزین برای تولید قطعات پیچیده فلزی صنایع نیروگاهی رو به رشد بوده و به طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق سویلر توربین گاز از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل IN625 به روش ذوب انتخابی لیزر در شرایط بهینه‌ای از متغیرهای اصلی فرایند ساخت نظیر توان لیزر، سرعت اسکن و اندازه ضخامت لایه‌های ذوب شده با هدف دستیابی به ریز ساختار و خواص مکانیکی مطلوب با کمترین میزان انحراف ابعادی و کیفیت سطحی بالا ساخته شد. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری بر روی نمونه‌های شاهد انجام شد و عیوب ساختاری نظیر ذوب موضعی ناقص، فازهای اکسیدی غیر فلزی، تخلخل و همچنین میکرو ترک شناسایی شد. سویلر پرینت شده به روش غیر تماسی ابعاد- برداری و در کلیه سطوح مهم و نهایی با مدل کامپیوتری مقایسه شد. کیفیت سطحی و دقت ابعادی قطعه قابل قبول بوده و در محدوده تیرانسی ساخت قطعه ریخته‌گری ارزیابی شد. همچنین آزمون‌های سختی و کشش در دمای محیط بر روی نمونه‌های شاهد عملیات حرارتی شده، انجام شد. نتایج نشان داد که مقادیر خواص کششی نمونه‌های پرینت شده در پارامترهای استحکام تسلیم و استحکام نهایی بالاتر ولی در پارامتر ازدیاد طول نسبی پائین‌تر و میزان سختی نیز یکسان بوده است.

Additive manufacturing of nickel-based superalloy gas turbine components

Ali Mohammad Kolagar

Material Science & Engineering, MavadKaran Engineering Company, Mapna Group, Tehran, Iran.
P.O.B. 31755/144, Karaj, Iran, Kolagar.AliMohammad@mapnamk.com

Article Information

Original Research Paper
Received: 28 June 2022
First Decision: 6 July 2022
Accepted: 6 August 2022

Keywords:

Additive Manufacturing
SLM
Superalloy
Swirler
Gas turbine

Abstract

The swirler of the gas turbine combustion chamber is usually designed from nickel-based superalloys and produced by the conventional precision casting method under vacuum. The production of such parts is associated with high scrap due to geometrical complexity, high dimensional accuracy and also the use of ceramic cores. In recent decades, the use of the additive manufacturing process as a new and alternative method has been growing for the production of complex metal parts in the power plant industry. In this research, a gas turbine Swirler and several Inconel 625 samples were fabricated by SLM in optimal conditions of the main variables of the manufacturing process such as laser power, scanning speed and the thickness of the melted layer. Microstructural studies were performed by optical Microscope on samples and some structural defects such as incomplete local melting, porosity, non-metallic oxide phases and Microcracks were identified. The printed swirler was compared with the computer model in all important and final Surfaces by non-contact dimensioning method. The surface quality and dimensional accuracy of the part were acceptable and it was evaluated within the tolerance range of the casting part. Also, hardness and tensile tests at ambient temperature were performed on the heat treated samples. The results showed that the values of the tensile properties of the printed samples were higher in the parameters of yield strength and ultimate strength, but lower in the parameter of relative elongation and the hardness was also the same.

۱- مقدمه

می‌گذرد. این دستاورد بزرگ ابتدا نمونه‌سازی سریع^۱ نام گرفت اما در ادامه به نام فناوری ساخت افزایشی^۲ که معنای جامع‌تری را در بردارد، تغییر نام یافت. در فناوری‌های ساخت افزایشی،

از اولین باری که بشر توانست صرفاً با داشتن اطلاعات دیجیتالی از یک شی، مدل آن را بدون نیاز به ابزار بسازد، حدوداً ربع قرن

¹ Rapid Prototyping² Additive Manufacturing

Please cite this article using:

A. M. Kolagar, Additive manufacturing of nickel-based superalloy gas turbine components, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 38- 45, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.157668>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تأثیر بسزایی دارد، با چالش جدی مواجهه بوده و برای ساخت قطعات بحرانی، دستیابی به خواص عملکردی مشخص از قبیل خواص خزشی، خستگی و کششی دمای بالا در مقایسه با قطعاتی که به روش نوردی ساخته می‌شوند، راه طولانی در پیش است [۳-۵].

با افزایش تقاضا برای ساخت قطعات به روش SLM، اهمیت اولیه جهت رسیدن به درک بهتر از ارتباط بین فرایند-ریزساختار به منظور کنترل فرایند بهینه و اطمینان از عملکرد قطعات ساخته شده به کمک لیزر، مهم تلقی می‌گردد. در شکل ۳، ارتباط بین متغیرهای فرایند SLM، ریزساختار و خواص قطعه پرینت شده نشان داده شده است.

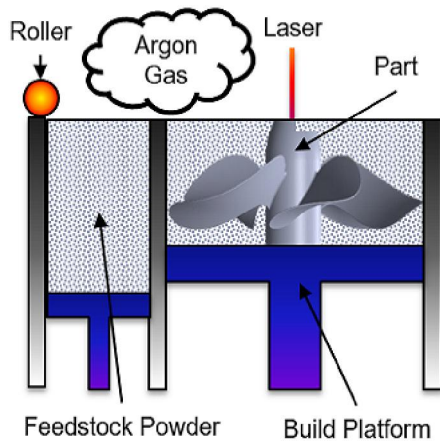


Fig. 2 A diagram detailing a SLM system and process [3]

شکل ۲ دیاگرام جزئیات سیستم SLM و فرایند ساخت [۴]

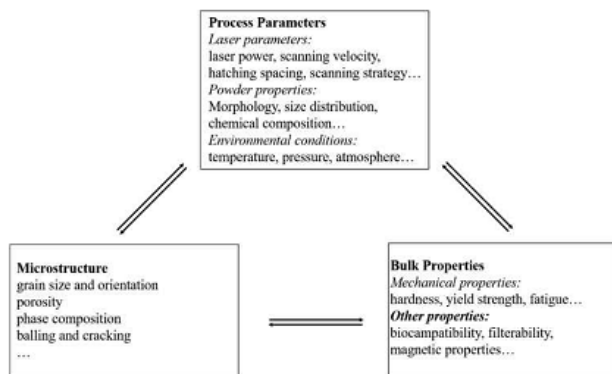


Fig. 3 Correlation among the SLM process parameters, microstructure, and as-built part properties [6]

شکل ۳ ارتباط بین متغیرهای فرایند SLM، ریزساختار و خواص قطعه پرینت شده [۶]

ریزساختار قطعات ساخته شده به روش فرایند افزایشی، به متغیرهای فرایند از جمله توان لیزر، سرعت اسکن، فاصله هچ^۴ و

مدل کامپیوتری قطعات سه بعدی^۱ به صورت لایه به لایه و مجازی برش داده شده و با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری تولید می‌شوند. این قطعات می‌تواند از هر مدل دیجیتالی (STL، AM Files، ...) و به هر هندسه‌ای که مورد مطلوب است، تولید شوند. البته پسوند STL مرسوم‌ترین فرمتی است که برای ماشین‌های تولید افزایشی قابل خواندن است. در شکل ۱ شماتیک مراحل فرایند ساخت قطعات به روش ساخت افزایشی نشان داده شده است [۱، ۲].

تکنولوژی ساخت افزایشی فلزات از جمله روش ذوب انتخابی لیزر^۳ (SLM) در سال‌های اخیر کاربردهای موفقیت‌آمیزی در صنعت هوا فضا و همچنین توربین‌های گاز در بخش انرژی داشته است. در این روش، پودر خالص فلزی و یا پودرهای مختلف فلزاتی که به منظور آلیاژسازی با هم مخلوط شده‌اند لایه به لایه مطابق مدل کامپیوتری توسط باریکه لیزر ذوب شده و مستقیماً قطعات فلزی با هندسه پیچیده و با دقت و دانسیته بالا نزدیک به شکل نهایی ساخته می‌شود. صرفه‌جویی در مواد مصرفی، کنترل نسبتاً آسان فرایند و همچنین عملکرد نسبتاً خوب قطعات ساخته شده در این روش از دیگر مزیت‌های آن در مقایسه با روش‌های مرسوم از جمله روش ریخته‌گری و فورج-کاری می‌باشد [۳]. در شکل ۲، فرایند ساخت قطعات به روش ذوب انتخابی به کمک لیزر، نشان داده شده است [۴].

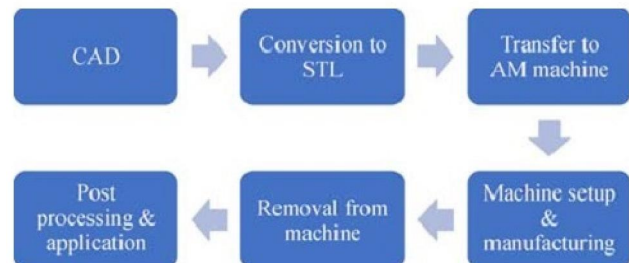


Fig. 1 Schematic of processes of AM to produce parts [2]

شکل ۱ شماتیک مراحل فرایند ساخت قطعات به روش ساخت افزایشی [۲]

در فرایند پرینت سه بعدی ارتباط بین متغیرهای فرایند و ریزساختار مورد نظر آلیاژ هنوز به درستی مشخص نمی‌باشد. در این روش جلوگیری از تشکیل ترک، حذف تنش‌های پسماند که گاهی اوقات حذف و یا کاهش آن با استفاده از فرایندهای حرارتی دشوار است و همچنین کنترل ریزساختار آلیاژ به ویژه فازهای رسوبی ثانویه که در عملکرد سوپرآلیاژهای پایه نیکل

¹ Computer-aided design (CAD)

² Standard Template Library

³ Selective Laser Melting

⁴ Hatch Spacing

دستگاه لیزر CO₂ با حداکثر توان ۲۰۰ وات تحت گاز محافظ آرگون-گرید ۲ و با پارامترهای کنترلی بهینه مندرج در جدول ۲ صورت گرفت. در ابتدا برای مشخصه‌یابی و رسیدن به پارامترهای بهینه، فرایند پرینت سه بعدی بر روی نمونه‌های آزمایشی اجرا و سپس قطعه نهایی در شرایط بهینه‌ای از متغیرهای اصلی فرایند ساخت نظیر توان لیزر، سرعت اسکن و اندازه ضخامت لایه‌های ذوب شده با هدف دستیابی به حداکثر میزان چگالی و کیفیت سطحی مناسب مطابق آنچه که در شکل ۴ نشان داده شده است، ساخته شد. برای افزایش کیفیت سطحی و تمیزکاری، قطعه پرینت شده مطابق استاندارد ASTM D71127-05 [۸] تحت عملیات ساچمه‌زنی^۶ قرار گرفت. پس از پایان فرایند ساچمه‌زنی سطوح مهم و نهایی قطعه با استفاده از دستگاه صافی سنج^۷ اندازه گیری شد و میزان کیفیت سطحی (R_a) برای سطوح مختلف بین ۲ تا ۳ میکرون گزارش شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی پودر سوپرآلیاژ از جنس IN625 (درصد وزنی)

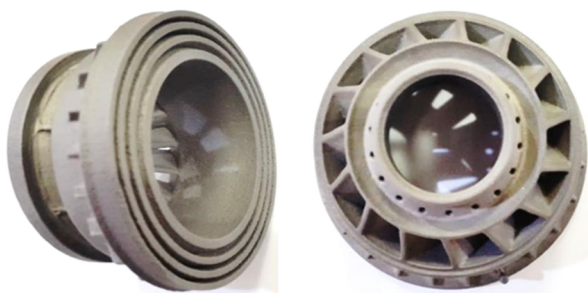
Table 1 Chemical composition of IN625 powder metal, Weight %.

C	Cr	Mo	Fe	Si	W	S	P	Ti	Co	Al	Nb	Ni
۰/۰۸	۲۲	۹/۰	۴/۵	۰/۵	۰/۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۴	۰/۹	۰/۴	۰/۱	باقی

جدول ۲ پارامترهای کنترلی بهینه برای پرینت سه بعدی سویلر به روش SLM

Table 2 Optimum control factors of Swirler SLM printing

گاز محافظ	توان لیزر (وات)	سرعت اسکن (میلیمتر بر ثانیه)	اندازه ضخامت لایه ذوب شده (میکرون)
آرگون-گرید ۲	۱۸۵	۳۵۰	۴۰



الف- تصویر روبرو ب- تصویر سه بعدی

Fig. 4 Images of IN625 Ni-based superalloy Swirler fabricated by SLM

شکل ۴ تصویر سه بعدی سویلر ساخته شده به روش SLM از جنس سوپرآلیاژ IN625

به منظور شناسایی عیوب سطحی از جمله ترک، قطعه پرینت شده تحت آزمون‌های بازرسی با مایع نافذ قرار گرفت و

ضخامت لایه ذوب شده بستگی دارد [۳،۵]. به منظور بررسی اثر متغیرهای لیزر در ارزیابی ریزساختار در فرایند SLM، محققان معمولاً یک پارامتر ترکیبی با عنوان دانسیته انرژی^۱ که بصورت رابطه (۱) بیان می‌شود را در نظر می‌گیرند:

$$E=P/(V \times h \times t) \quad (1)$$

در این رابطه P توان لیزر، V سرعت اسکن، h فاصله هج و t ضخامت لایه ذوب شده می‌باشد. این متغیرهای لیزر، نقش مهمی در تعیین گرادیان حرارتی^۲، سرعت سرد شدن^۳ و جهت جریان حرارت به صورت موضعی که بر روی مورفولوژی، اندازه و جهت رشد دانه تأثیر گذارند، بازی می‌کند. Monroy و همکارانش اثر متغیرهای توان لیزر و سرعت اسکن را بر روی اندازه دانه در ساخت قطعه‌ای از جنس سوپرآلیاژ پایه کبالت به روش SLM بررسی کردند. آنها اعلام کردند که با افزایش توان لیزر، اندازه دانه بواسطه افزایش انرژی اعمالی افزایش و با افزایش سرعت اسکن بخاطر کاهش زمان تابش لیزر و سرعت بیشتر انجماد، کاهش می‌یابد [۶].

سوپرآلیاژ پایه نیکل IN625 یک سوپر آلیاژ استحکام یافته از طریق محلول جامد بوده که استحکام خود را بواسطه حضور عناصر آلیاژی از قبیل Mo و Nb بدست می‌آورد. این آلیاژ به دلیل استحکام در دمای بالا، استحکام خزشی، استحکام خستگی، مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون و سایش عالی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف مانند هوافضا، شیمیایی، دریایی و پتروشیمی پیدا کرده است [۷]. در این تحقیق سویلر توربین گاز از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل IN625 به روش ذوب انتخابی لیزر با متغیرهای بهینه فرایند با هدف دستیابی به ریزساختار مناسب، خواص مکانیکی مطلوب با کمترین میزان انحراف ابعادی و کیفیت سطحی بالا ساخته شده و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- روش انجام آزمایش

در این تحقیق از پودر سوپرآلیاژ پایه نیکل IN625 برای ساخت سویلر^۴ توربین گاز به روش ذوب انتخابی لیزر استفاده شد. ترکیب شیمیایی اسمی پودر اتمایز شده گازی^۵ سوپرآلیاژ پایه نیکل IN625 با متوسط اندازه ذرات کروی ۳۵ میکرون، در جدول ۱ آمده است. فرایند پرینت سه بعدی سویلر ۶۵۰ گرمی با قطر بزرگتر ۹۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر با استفاده از

¹ Energy Density

² Thermal Gradient

³ Cooling Rate

⁴ Swirler

⁵ Gas Atomized

⁶ Shoot Peening

⁷ Roughness Gauge

آزمون کشش در دمای محیط و سختی به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM E8m [۱۰] و ASTM E18 [۱۱] صورت گرفت. نتایج خواص مکانیکی نمونه‌های پرینت شده و همچنین حداقل خواص مکانیکی اعلام شده توسط شرکت OEM برای سوپرآلیاژ پرینت شده IN625 [۹] در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ نتایج آزمون‌های کشش دمای محیط و سختی نمونه‌های ساخته شده به روش SLM از جنس سوپرآلیاژ IN625

Hardness, Rc	El, %	UTS, MPa	0.2% Y.S, MPa	مشخصات
۳۰	۷/۸	۹۰۰	۶۶۸	نمونه شماره ۱
۳۲	۸/۷	۹۱۳	۶۴۱	نمونه شماره ۲
۳۱	۷/۶	۸۶۱	۶۲۵	نمونه شماره ۳
۳۰	۳۰	۸۲۷	۵۵۰	اطلاعات فنی شرکت OEM ^۳ (حداقل) [۹]

برای انجام آزمون متالوگرافی و بررسی ریزساختار فصل مشترک بین لایه‌های رسوبی، یک نمونه اضافی به همراه نمونه‌های کشش با همان شرایط بهینه پرینت شد. نمونه‌ها پس از برش با دستگاه وایرکات، سنباده‌زنی و سپس با خمیر الماسه ۱ و ۳ میکرون پولیش شدند. نمونه‌های مانت شده به روش الکتروشیمیایی توسط محلول اگزالیگ حاوی ۱۰ میلی‌گرم اسید اگزالیگ و ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اچ شدند. از محلول ماربل حاوی ۵۰ میلی‌لیتر HCl، ۵۰ میلی‌لیتر H₂O و ۱۰ گرم CuSO₄ نیز برای مشاهده بهتر فازهای رسوبی استفاده شد. عیوب متالورژیکی در لایه‌های رسوبی از قبیل اکسیدها، تخلخل‌ها و همچنین ترک‌ها در برزگنمایی‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ نوری LEICA مدل DM2500 متصل به نرم‌افزار تحلیل گر تصویری اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفت.

۳- تحلیل نتایج

۳-۱- بررسی‌های ریزساختار

بررسی‌های ریزساختاری اطلاعات مفیدی در خصوص مکانیزم‌هایی که سبب اختلاف در نتایج مکانیکی می‌شود، فراهم می‌کند. ریزساختار ایجاد شده در فرایند SLM سوپرآلیاژهای مصرفی در توربین‌های گاز، معمولاً دانه‌های ریز کشیده دارند. در شکل ۷ تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار نمونه‌های شاهد ساخته شده به روش SLM از جنس سوپرآلیاژ IN625، نشان داده شده است.

هیچگونه عیوب سطحی در نواحی لایه نشانی شده قطعه مشاهده نشد. همچنین جهت بررسی کیفیت ابعادی قطعه پرینت شده، به روش غیر تماسی ابعادبرداری نوری سه بعدی^۱ صورت گرفت و سپس به کمک نرم‌افزار Catia مدل‌سازی شد و در نهایت با مدل کامپیوتری قطعه بصورت جامع و کامل در سطوح مختلف، مقایسه شد.

برای انجام آزمون کشش در دمای محیط، سه نمونه کشش با ابعاد مقطع ۵×۵ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر مطابق شکل ۵ با پارامترهای بهینه پرینت شد. به منظور حذف تنش‌های باقیمانده ناشی از فرایند ساخت، نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای ۸۷۰°C نگهداری شد و سپس در هوا سرد شد [۹]. مطابق استاندارد برای رساندن نمونه‌های پرینت شده به ابعاد نهایی، ماشینکاری براساس نقشه ابعادی نمونه‌های کوچک شده^۲ (شکل ۶) انجام شد. سطوح ماشینکاری شده جهت شناسایی عیوب سطحی تحت آزمون بازرسی با مایع نافذ قرار گرفت و هیچگونه عیوب سطحی مشاهده نشد.

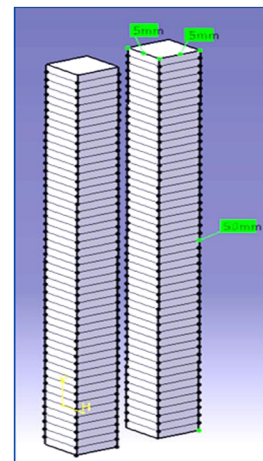


Fig. 5 As SLM IN625 tensile test specimens image

شکل ۵ تصویر نمونه‌های آزمون کشش از جنس سوپرآلیاژ IN625 ساخته شده به روش SLM

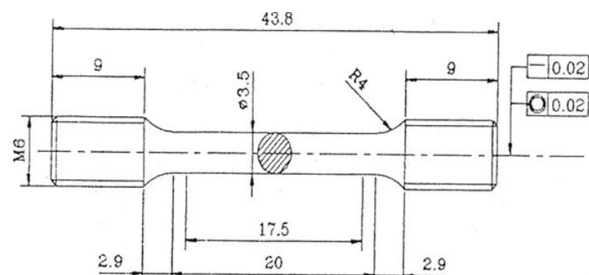


Fig. 6 Dimensional of tensile test specimens [8]

شکل ۶ نقشه و ابعاد نمونه‌های آزمون کشش جهت ماشین‌کاری [۱۰]

³ Original Equipment Manufacturer

¹ Digitizing

² Sub Size

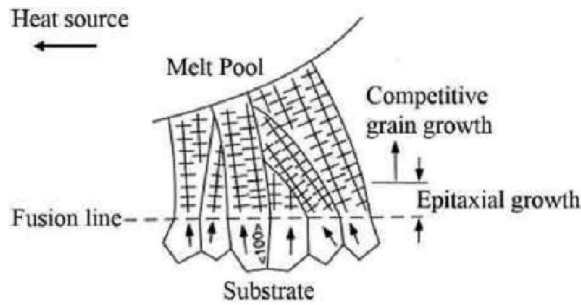


Fig. 8 Schematic of grain growth in SLM including initial epitaxial growth and subsequent competitive [6]

شکل ۸ شماتیک رشد دانه شامل رشد اپیتکسی اولیه و سپس رشد رقابتی در ساخت قطعات روش SLM [۶]

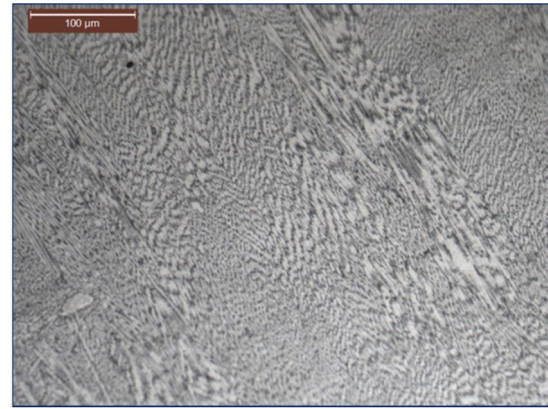


Fig. 7 Optical microscopy image showing cellular and dendritic-columnar of IN625 Samples built SLM technique

شکل ۷ تصویر میکروسکوپی نوری از ساختار سلولی و دندریتی-ستونی سوپرآلیاژ IN625 ساخته شده به روش SLM

به‌عنوان مثال مواد فلزی پایه با ساختار FCC^۱ دارای رشد در امتداد جهات کریستالوگرافی $\langle 001 \rangle$ دارند. بنابراین دانه‌ها با جهات مشابه یا نزدیک به جهت گرادیان حرارتی سریع‌تر رشد می‌کنند در حالی که دانه‌ها با جهات دیگر بواسطه رشد رقابتی دانه‌های مختلف بطور تدریجی، متوقف می‌شود. علاوه بر آن، رشد عمودی دانه‌ها زمانیکه دانه‌های مجاور به یکدیگر برخورد می‌کنند، با نرخ بالایی منجر به رشد دانه‌های کشیده با توجه به شانس کم جوانه‌زنی دانه‌های دیگر در مذاب جلوی ناحیه ستونی می‌گردد. در نتیجه، طی فرایند انجماد پدیده رشد رقابتی منجر به ایجاد ساختار دانه‌بندی ستونی غیرجهت‌دار همانند آنچه که در ساختار قطعات ساخته شده به روش SLM مشاهده می‌شود، می‌گردد [۶].

مطابق شکل ۹، شکل‌های مختلف فصل مشترک مذاب-جامد از قبیل جبهه انجماد صفحه‌ای^{۱۱}، سلولی، دندریتی-ستونی یا دندریتی-هم‌محور بواسطه تغییرات گرادیان حرارتی (G)، سرعت انجماد^{۱۲} (R)، مادون انجماد^{۱۳} (ΔT) و ضریب نفوذ انحلال^{۱۴} (D_L) بوجود می‌آیند. براساس تئوری انجماد، مورفولوژی و زیرساخت^{۱۵} ساختار (ریزی/اندازه دانه) به شدت متأثر از نسبت‌های G/R و G.R می‌باشد. در زیر حوضچه مذاب، جاییکه سرعت انجماد صفر می‌باشد ($R \approx 0$) نسبت G/R بی‌نهایت بوده و ساختار دانه با فصل مشترک صفحه‌ای غالب می‌باشد. زمانیکه نسبت G/R به کمتر از $\Delta T / D_L$ کاهش می‌یابد، انجماد با فصل مشترک سلولی نزدیک به ناحیه صفحه‌ای رخ می‌دهد. کاهش بیشتر نسبت G/R منجر به تشکیل فصل مشترک دندریتی-ستونی می‌گردد. انجماد هم‌محور نیز نزدیک به سطح

در این روش بخاطر فرایند انجماد غیرتعادلی و سرعت خیلی بالای سرمایش (10^6 K/s) [۳] ساختار فاز زمینه از ساختار سلولی^۱ و دندریتی-ستونی^۲ ریز تشکیل شده و هیچ شواهدی از حضور فازهای رسوبی تعادلی نظیر کاربیدها، ساختار دندریتی-هم‌محور^۳ همانند آنچه که در قطعات ریخته‌گری وجود دارد، مشاهده نمی‌شود.

در فرایند ذوب انتخابی لیزر فلزات، ارزیابی ساختار دانه‌بندی به مواردی از قبیل اندازه، مورفولوژی^۴ و جهات رشد دانه^۵ اشاره دارد که بعنوان بافت کلیدی ریزساختار، مشخص کننده عملکرد مکانیکی قطعات پرینت شده سه بعدی می‌باشد. مشابه فرایندهای مرسوم جوشکاری، رشد دانه در روش SLM تحت یک فرایند انجمادی متمرکز^۶ و اپیتکسی^۷ هم‌جهت با رشد کریستال‌های فلز پایه آغاز (جهت $\langle 001 \rangle$) و با رشد رقابتی^۸ به مرکز حوضچه مذاب^۹ پیش می‌رود. همزمان با برخورد اشعه لیزر به پودر فلز حوضچه مذاب تشکیل می‌شود و با عبور از آن ناحیه، فرایند انجماد با رشد اپیتکسی بر روی دانه‌های فلز پایه یا لایه قبلی رخ می‌دهد. علاوه بر مورفولوژی دانه، جهات رشد دانه هم‌سو با جهت گرادیان حرارتی و در راستای جهت انجماد می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد در مرحله اول انجماد، دانه‌های اپیتکسی دارای جهات مختلف می‌باشند. در هر حال بخاطر اثر کریستالوگرافی فلز پایه روی ساختار دانه بواسطه رشد ترجیحی در جهات کریستالوگرافی ویژه تأثیر می‌گذارد.

¹ Cellular
² Columnar-Dendritic
³ Equiaxed-Dendritic
⁴ Morphology
⁵ Grain Orientation
⁶ Localized Solidification
⁷ Epitaxial Growth
⁸ Competitive Growth
⁹ Melt Pool

¹⁰ Face Center Cubic
¹¹ Planar Solidification
¹² Solidification Rate
¹³ Undercooling
¹⁴ Solute Diffusion Coefficient
¹⁵ Substructure

انعطاف‌پذیری نسبی آن کمتر از ۳۰٪ نمونه‌های شرکت OEM است.

حوضچه مذاب جائیکه گرادیان حرارتی نسبتاً کم می‌شود، اتفاق می‌افتد [۶].

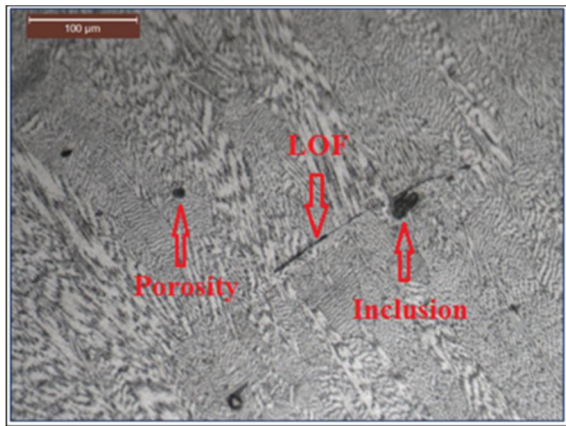


Fig. 10 Optical microscopy image showing some defects in IN625 Samples 3D printed using SLM

شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپی نوری از عیوب ساختاری در ریز ساختار سوپرآلیاژ IN625 ساخته شده به روش SLM

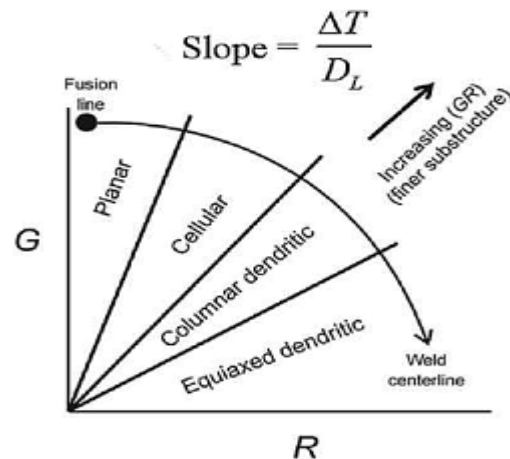


Fig. 9 Schematic of the effects of temperature gradient G and solidification rate R on grain morphology in SLM process [6]

شکل ۹ شماتیک اثرات گرادیان حرارتی (G) و سرعت انجماد (R) روی مورفولوژی دانه‌ها در فرایند پرینت سه بعدی به روش SLM [۶]



Fig. 11 The microstructure of IN625 Samples built SLM technique showing Micro Crack

شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپی نوری از میکرو ترک در ریزساختار سوپرآلیاژ IN625 ساخته شده به روش SLM

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تصویر میکروسکوپ نوری از حضور عیوب ساختاری نظیر ناخالصی‌های اکسیدی، تخلخل، ذوب موضعی ناقص^۱ و همچنین میکروتک به طول تقریبی ۱۰۰ میکرون در ساختار سوپرآلیاژ IN625 ساخته شده به روش SLM مشاهده شده است. حضور فازهای اکسیدی غیرفلزی احتمالاً بیانگر عدم کارایی مناسب سیستم محافظت حوضچه مذاب توسط اعمال گاز آرگون در مقابل نفوذ اکسیژن محیط می‌باشد.

۲-۳- بررسی خواص کشش دمای محیط و سختی

جهت مطالعه اثر متغیرهای فرایند روی عملکرد قطعه پرینت شده، آزمون کشش دمای محیط بعنوان ابزاری جهت بهینه‌سازی پارامترها، تایید صلاحیت روش و مقایسه شرایط فرایند انجام شده است. در این تحقیق نتایج آزمون‌های کشش دمای محیط و سختی نمونه‌های پرینت شده به همراه حداقل خواص مکانیکی اعلام شده توسط شرکت OEM برای سوپرآلیاژ پرینت شده IN625 جهت بررسی و مقایسه در نمودار شکل ۱۲ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متوسط استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه‌های پرینت شده از حداقل استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه‌های شرکت OEM به ترتیب به میزان ۱۷/۳٪ و ۷/۸٪ بیشتر می‌باشد در حالی که متوسط درصد

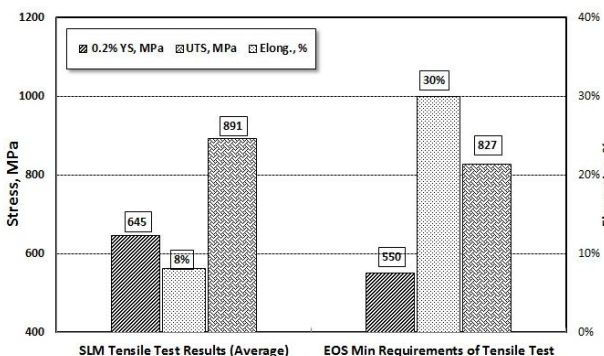


Fig. 12 Comparison diagram of IN625 specimens Tensile test results
شکل ۱۲ نمودار مقایسه نتایج آزمون‌های کشش دمای محیط نمونه‌های ساخته شده به روش SLM با حداقل خواص کششی شرکت OEM

¹ Lack of Fusion

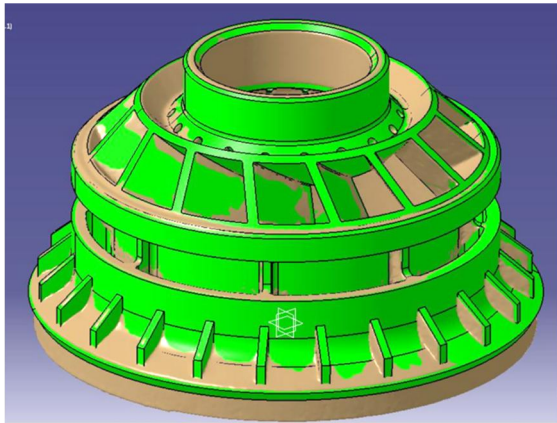


Fig. 13 Comparison dimensional deviation between part fabricated by SLM Via digital model

شکل ۱۳ مقایسه میزان انحرافات ابعادی سویلر ساخته به روش SLM با مدل کامپیوتری

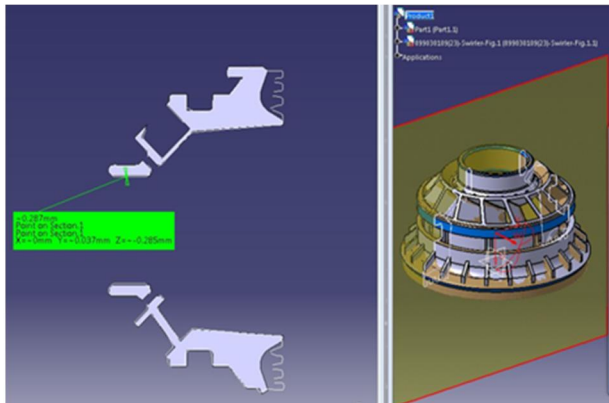


Fig. 14 Cross-section parallel to the build direction in the middle of Inconel 625 sample fabricated by SLM for Comparing dimensional deviation Via digital model

شکل ۱۴ تصویر مقطع طولی برش خورده سویلر ساخته به روش SLM جهت اندازه گیری میزان انحرافات ابعادی در مقایسه با مدل کامپیوتری

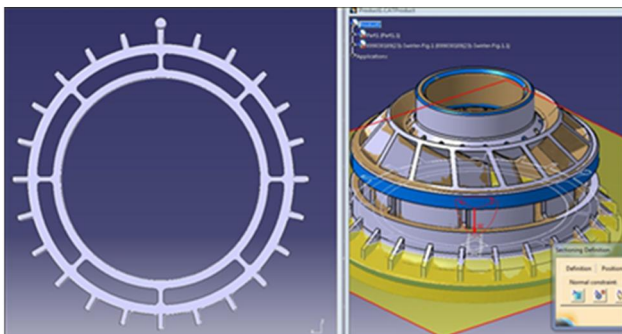


Fig. 15 Cross-sections perpendicular to the build direction in the middle of Inconel 625 sample fabricated by SLM for Comparing dimensional deviation Via digital model

شکل ۱۵ تصویر مقطع عرضی برش خورده سویلر ساخته به روش SLM جهت اندازه گیری میزان انحرافات ابعادی در مقایسه با مدل کامپیوتری

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق سویلر توربین گاز از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل

کاهش درصد انعطاف پذیری احتمالاً به حضور تخلخل، ترک و همچنین ذوب موضعی ناقص بر می گردد که می تواند موجب کاهش میزان پیوستگی بین لایه ها، کاهش خواص مکانیکی و در نتیجه کاهش عمر قطعات در شرایط سرویس گردد. همچنین متوسط سختی نمونه های پرینت شده از سختی اسمی نمونه های شرکت OEM به اندازه ۳/۳٪ بیشتر می باشد که این میزان اختلاف ناچیز احتمالاً به ساختار ظریف تر نمونه های پرینت شده با درجه فوق اشباع بالاتر ناشی از حضور عناصر استحکام دهنده بر می گردد.

۳-۳- بررسی های ابعادی و کیفیت سطح

یکی از فاکتورهایی که بر عملکرد بهینه محفظه احتراق توربین گاز تاثیر بسزایی دارد، مشخصات ابعادی و کیفیت سطح اجزاء و قطعات مهم آن نظیر سویلر است. معمولاً این قطعات براساس قواعد مکانیک سیالات طراحی شده و دارای خصوصیتی هستند تا حداکثر بازدهی از توربین گاز گرفته شود. این خصوصیات ابعادی دارای تolerانس هایی هستند که سازندگان باید آنها را رعایت نمایند. بنابراین رسیدن به تolerانس های ساخت، چه با روش های مرسوم مثل ریخته گری و چه با روش های امروزی از قبیل پرینت سه بعدی از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.

برای بررسی سلامت هندسی قطعه پرینت شده، ابعاد برداری نوری سه بعدی به روش غیر تماسی صورت گرفت و سپس مدل سازی توسط نرم افزار Catia انجام پذیرفت. همان طوری که در تصویر شکل ۱۳ مشاهده می شود، بین قطعه پرینت شده (رنگ قهوه ای) و مدل کامپیوتری (رنگ سبز) در جهات مختلف بخصوص در قسمت سطوح شیب دار و همچنین سطوح نهایی که معمولاً ماشینکاری نمی شوند، تطابق ابعادی قابل قبولی وجود دارد.

برای بررسی دقیق تر کیفیت ابعادی، مقاطع برش خورده طولی و عرضی قطعه پرینت شده مطابق تصاویر شکل های ۱۴ و ۱۵ با مدل کامپیوتری مقایسه شد. میزان انحرافات ابعادی در سطوح شیب دار و حساس، کمتر از ± 0.25 میلی متر اندازه گیری شده که نشان می دهد تolerانس های آن قابل مقایسه با تolerانس های قطعه ریخته گری بوده و در محدوده مجاز تolerانسی ساخت این قطعه می باشد. همچنین سویلر پرینت شده از کیفیت سطحی خوبی برخوردار بوده و اندازه صافی سطح بعد از فرایند ساچمه زنی برای سطوح نهایی بین ۲ تا ۳ میکرون گزارش شده که در محدوده مجاز می باشد.

۵- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از کلیه دوستان و همکاران در شرکت مهندسی موادکاران و شرکت فلزکام کوشا که در اجرای این تحقیق اینجانب را یاری نموده‌اند، کمال تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

۶- مراجع

- [1] A. Uriondo, M. Esperon-Miguez, S. Perinpanayagam, "The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects", Journal of aerospace engineering, 2015.
- [2] X. Niu, S. Singh, A. Garg, H. Singh, B. Panda, X. Peng, Q. Zhang, "Review of materials used in laser-aided additive manufacturing processes to produce metallic products", Front Mechanical Engineering, 2019.
- [3] Md Ashabul Anam, *Microstructure and mechanical properties of selective laser melted superalloy IN625*, Department of Industrial Engineering, Louisville, Kentucky, 2018.
- [4] B. Graybill, Ming Li, D. Malawey, Chao Ma, "Additive manufacturing of nickel based superalloys", Proceedings of the ASME 2018 13th International, Manufacturing Science and Engineering Conference, June 18-22, College Station, TX, USA, 2018.
- [5] Moataz M. Attallah, Rachel Jennings, Xiqian Wang, and Luke N. Carter, "Additive manufacturing of Ni-based superalloys: The outstanding issues", MRS Bulletin, Vol. 4, 2016.
- [6] Xing Zhang, C. J. Yocom, Bo Mao, and Yiliang Liao, "Microstructure evolution during selective laser melting of metallic materials-A review", 2019.
- [7] Shuai Li, Qingsong Wei, Yusheng Sh, Zicheng Zhu, Danqing Zhang, "Microstructure Characteristics of Inconel625 Superalloy Manufactured by Selective Laser Melting", 2016.
- [8] ASTM D71127-05, "Standard Test Method For Measurement of Surface Roughness of Abrasive Blast Cleaned Metal Surfaces Using A Portable Stylus Instrument", 2017.
- [9] EOS Nickel Alloy IN625, "Material data sheet, Electro Optical Systems", pp. 01-05, 2011.
- [10] ASTM E8/E8m-09, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", 2010.
- [11] ASTM E18-10, "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials", 2010.

IN625 به روش ذوب انتخابی لیزر ساخته شد و ریزساختار، خواص مکانیکی و همچنین کیفیت سطحی و ابعادی آن مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ذیل بدست آمد:

- در آزمون بازرسی با مایع نافذ، هیچگونه عیوب متالورژیکی در سطح قطعه پرینت شده مشاهده نشده است.

- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های پرینت شده نشان داده است که فاز زمینه از ساختار سلولی و دندریتی-ستونی ریز تشکیل شده و هیچ شواهدی از حضور فازهای رسوبی تعادلی نظیر کاربیدها، ساختار دندریتی هم‌محور همانند آنچه که در قطعات ریخته‌گری وجود دارد، مشاهده نمی‌شود.

- متوسط استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه‌های پرینت شده از حداقل استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه‌های شرکت OEM به ترتیب به میزان $17/3\%$ و $7/8\%$ بیشتر می‌باشد در حالیکه متوسط درصد انعطاف‌پذیری نسبی آن کمتر از 30% نمونه‌های شرکت OEM است. کاهش درصد انعطاف‌پذیری احتمالاً به حضور تخلخل، میکروتوک و همچنین ذوب موضعی ناقص بر می‌گردد که می‌تواند موجب کاهش میزان پیوستگی بین لایه‌ها و کاهش خواص مکانیکی گردد.

- متوسط سختی نمونه‌های پرینت شده از سختی اسمی نمونه‌های شرکت OEM به اندازه $3/3\%$ بیشتر می‌باشد که این میزان اختلاف ناچیز می‌تواند بخاطر ساختار ظریف‌تر نمونه‌های پرینت شده با درجه فوق اشباع بالاتر ناشی از حضور عناصر استحکام دهنده باشد.

- تطابق ابعادی خوبی بین قطعه پرینت شده و مدل کامپیوتری در جهات مختلف بخصوص در قسمت سطوح شیبدار و همچنین سطوح نهایی که معمولاً ماشینکاری نمی‌شوند، وجود دارد.

- بیشترین میزان انحرافات ابعادی در سطوح شیبدار و حساس، کمتر از $0/25 \pm$ میلی‌متر اندازه‌گیری شده که نشان می‌دهد انحرافات ابعادی در محدوده مجاز تoleransi ساخت این قطعه به روش ریخته‌گری می‌باشد.

- کیفیت صافی سطح قطعه پرینت شده بعد از فرایند ساچمه‌زنی برای سطوح حساس و نهایی بین ۲ تا ۳ میکرون اندازه‌گیری شده که در محدوده مجاز می‌باشد.